

0-775227

На правах рукописи

**РУДЬ ЕВГЕНИЙ ЛЕОНИДОВИЧ**

**Импульсные высотомеры на основе твердотельных и  
полупроводниковых лазеров для контроля окружающей  
среды и характеристик объектов подстилающей  
поверхности**

**05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий**



**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Казань 2009

Работа выполнена в Закрытом акционерном обществе “Скат-Р”,  
г. Москва

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Ларюшин Александр Иванович

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук  
Непогодин Иосиф Андреевич

кандидат технических наук  
Васильев Дмитрий Викторович

**Ведущая организация:** ГОУ ВПО “Казанский государственный  
технический университет им. А.Н. Туполева”

Защита состоится 20 марта 2009 г. в 14.30 часов на заседании  
диссертационного совета Д.212.082.01 при ГОУ ВПО «Казанский  
государственный энергетический университет» по адресу: 420066,  
г.Казань, ул. Красносельская, дом 51, КГЭУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО  
“Казанский государственный энергетический университет”,  
с авторефератом диссертации – на сайте <http://www.kgeu.ru/>

Автореферат разослан « 9 » феврал

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000506000

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Н.Л. Батанова

## Общая характеристика работы

**Актуальность.** Развитие импульсной лазерной локации на этапе выполнения диссертации отмечено широким функциональным многообразием: дальномеры, высотомеры, лидары, системы 3Д-регистрации и др. Это многообразие зависит от запросов потребительского рынка и от совершенствования применяемых для их создания импульсных твердотельных и полупроводниковых лазеров. Твердотельные лазеры с модулированной добротностью обеспечивают малую длительность зондирующего излучения и высокую энергию в импульсе, для измерения расстояний до нескольких десятков тысяч метров. Полупроводниковые лазеры имеют невысокую энергию излучения, но обладают высокой частотой зондирования, что позволяет обрабатывать информацию в режиме накопления для измерения расстояний до 800- 1000 м. По составу и принципу действия лазерные высотомеры существенно не отличаются от лазерных дальномеров, предназначенных для работы на горизонтальных трассах. Однако высотомеры имеют отличия, связанные с установкой их на борту летательного аппарата: 1) отсутствие собственного визира и рабочих управляемых органов, т.к. управление их работой производится с бортового компьютера; 2) необходимость иметь развитый интерфейс для двусторонней связи с центральным процессором – приема команд управления и оперативной передачи измерительной и диагностической информации; 3) необходимость выполнения требований по быстродействию, т.к. рабочее поле высотомера перемещается в картинной плоскости относительно объектов подстилающей поверхности со скоростью движения летательного аппарата, что требует частоту зондирования не менее 1Гц. Лазерные высотомеры в составе аэросъемочных комплексов мониторинга земли и атмосферы позволяют решать задачи: 1) контроль окружающей среды и картографирование местности; 2) измерение наклонной дальности до объектов, включая облака; 3) обзор подстилающей поверхности, обнаружение объектов, их идентификация и определение их координат и др. На период выполнения диссертационной работы были разработаны в ЗАО “Скат-Р” лазерные высотомеры ДЛ-1 (на основе полупроводникового лазера,  $\lambda=800-910$  нм) и ДЛ-2 (на основе твердотельного ИАГ-лазера,  $\lambda=1064$  нм), а также воздушные лазерные батиметрические системы SHOALS 1000т и воздушные сканеры ALTM-3100 (“Теолидар”, г. Москва), лазерные дальномеры зарубежного производства - Nikon ProStaff 550 Laser Range Finder 8369 (США), Bushnell Pinseeker 1500 Tournament Range Finder (США), Skycaddie SG2.5 rangefinder (Великобритания), Elop Mamba high-repetition laser range-finder (Израиль) и др., которые позволяют получать съемки высокой плотности, картографировать побережье, составлять морские карты, выполнять навигационные работы и др. Но очерченный круг задач не может быть решен одним универсальным высотомером или одной системой. Например, системы типа ALTM и SHOALS, применяемые в дорогостоящих уникальных исследовательских комплексах, непригодны для оснащения беспилотных летательных и пилотируемых низколетящих аппаратов. Они не обеспечивают разрешение по дальности для анализа вертикального профиля зондирующих объектов, а тип излучателей не обеспечивает идентификацию физического характера цели. Кроме того, излучение с длиной волны 830 и 1064 нм опасно для зрения. Следовательно, *возникает актуальная необходимость* разработать новые методы и

способы построения нового поколения импульсных лазерных высотомеров с безопасной для зрения длиной волны излучения.

**Цель работы.** Проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований, а также выполнение расчетных, схемотехнических и конструкторских решений, направленных на разработку новых методов и способов построения, создания и внедрения импульсных высотомеров на основе твердотельных и полупроводниковых лазеров с безопасной для зрения длиной волны излучения с повышенными точностью и разрешающей способностью для контроля окружающей среды, характеристик объектов подстилающей поверхности, химической разведки и другое в составе комплексов топографической аэросъемки и дистанционного мониторинга атмосферы и поверхности земли.

**Задачи исследований.** 1) анализ литературных и экспериментальных данных использования высотомеров на основе различных импульсных лазеров; 2) обоснование необходимости и возможности создания высотомеров на основе импульсных твердотельных и полупроводниковых лазеров с безопасной для зрения длиной волны излучения 1540 нм; 3) исследование методов определения дальности, преобразования наносекундных импульсов, временной фиксации импульсных сигналов; 4) анализ потенциальных возможностей светолокационного импульсного измерителя дальности с эффективным некогерентным накоплением; 5) создание и внедрение высотомеров для контроля окружающей среды и характеристик объектов в составе авиационных диагностических комплексов.

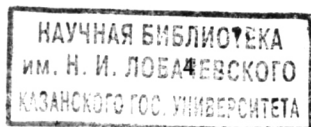
**Методы исследований.** При проведении исследований *(при наличии помех)* автором использовались: 1) методы определения дальности импульсными лазерными измерителями; 2) способы светолокационного определения дальности методом некогерентного накопления; 3) методы преобразования наносекундных интервалов; 4) методы определения временного положения импульсов; 5) метод Монте-Карло (метод статистических испытаний).

### **Научная новизна.**

*Предложены и реализованы автором*

1. Метод двойного лазерного зондирования удаленных объектов, научная новизна которого заключается в создании возможности излучения двух зондирующих импульсов и двойного включения добротности в течение одного цикла накачки твердотельного лазера с пассивным затвором с целью максимального сокращения длительности регистрируемой информации, повышения качества регистрируемого сигнала, значительного увеличения (в 5 раз) до 150 МГц тактовой частоты и минимизации интервала дискретизации, уменьшения регистрирующей аппаратуры и повышения в 4-5 раз точности.

2. Метод временной привязки импульсов высотомера на основе твердотельного лазера, основанный на модификации известного метода пересечения нуля, научная новизна которого состоит в введении в структуру приемного тракта высотомера второго дифференцирующего звена с постоянной времени, оптимальное значение которой от длительности входного сигнала позволяет устранить недостаток известного метода – уход момента пересечения нуля при изменении амплитуды входного сигнала в широких пределах и обеспечить неточность временной привязки сигнала 0,2-0,3 м.





3. *Новые способы реализации потенциальных возможностей* светолокационного импульсного измерителя с эффективным накоплением на основе полупроводникового лазера, *научная новизна* которых по отношению к известному способу некогерентного накопления методом статистической проверки гипотез состоит:

- в оценке временной фиксации сигнала по центру тяжести массива данных после накопления с целью увеличения измеряемой дальности в 1,3 раза;
- в определении дальности с учетом введения в оценку измерения поправки по сумме накопленных сумм или по количеству смежных дискрет, в которых накопленная сумма равна предельному значению, с целью повышения на порядок точности измерения.

4. *Схема с синхронным стартом высотомера с накоплением*, *научная новизна* которой заключается в синхронизации момента излучения зондирующего сигнала с тактовой частотой измерителя временных интервалов, обеспечивающая уменьшение среднеквадратического отклонения временной фиксации зондирующего сигнала относительно тактовой последовательности на порядок по отношению к схеме с асинхронным стартом.

#### **Практическая значимость работы.**

Разработанные с участием автора высотомеры на основе твердотельных и полупроводниковых лазеров с безопасной для зрения длиной волны излучения 1540 нм используются:

- 1) на основе твердотельных лазеров - в ООО "Открытое небо" в составе цифрового топографического аэроосъемочного комплекса картографического обоснования площадных объектов (топографические карты, кадастры, поселения и др.) и линейно-протяженных объектов (продуктопроводы, дороги, объекты гидрографии и др.);
- 2) на основе полупроводниковых лазеров - в ОАО "Раменский приборостроительный завод" в вертолетном комплексе дистанционного мониторинга атмосферы и поверхности земли.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. *Предложенный метод двойного лазерного зондирования* удаленных объектов, *обеспечивающий* возможность излучения двух зондирующих импульсов и двойного включения добротности за один цикл накачки импульсного твердотельного лазера с пассивным затвором, *позволяет* максимально *сократить* длительность регистрируемой информации, *повысить* качество регистрируемого сигнала, значительно (в 5 раз) *увеличить* тактовую частоту (до 150 МГц) и *минимизировать* интервал дискретизации, одновременно определять структуру объекта и дальность до него *в 4-5 раз точнее*, чем при моноимпульсном зондировании.

2. *Предложенный метод временной привязки импульсов высотомера на основе твердотельного лазера, основанный на модификации известного метода* пересечения нуля за счет введения в структуру приемного тракта высотомера второго дифференцирующего звена с постоянной времени, оптимальное значение которой в зависимости от длительности входного сигнала *устраняет недостаток известного метода* — уход момента пересечения нуля при изменении амплитуды входного сигнала в широких пределах и *обеспечивает* неточность временной привязки до 0,2-0,3 м, т.е. на порядок точнее прототипа.

3. *Новые способы реализации потенциальных возможностей* измерителя дальности с накоплением на основе полупроводникового лазера, которые по отношению к известному способу некогерентного накопления методом статистической проверки гипотез, *обеспечивают:*

а) *увеличение* измеряемой дальности в 1,3 раза за счет оценки временного положения сигнала по временной фиксации его по центру тяжести массива данных после накопления;  
б) *снижение* среднеквадратической погрешности измерений на порядок за счет введения в оценку дальности поправки по сумме накопленных сумм или по количеству смежных дискрет, в которых накопленная сумма равна предельному значению.

4. Предложенная *схема с синхронным стартом* высотомера с накоплением, обеспечивающая синхронизацию зондирующего сигнала с тактовой частотой измерителя временных интервалов, *уменьшает* среднеквадратическую ошибку фиксации сигнала относительно тактовой последовательности до 0,1 м, т.е. на порядок точнее схемы с асинхронным стартом.

**Апробация работы и публикации.** Материалы и основное содержание работы опубликовано в 7 печатных работах, в том числе в одном патенте и в одном решении о выдаче патента (с соавторами), список которых приведен в конце автореферата.

**Личный вклад соискателя.** Результаты, представленные в диссертации, получены лично соискателем или при его непосредственном участии. Автором лично выбраны пути решения поставленных задач и схемы исследований в рамках выполненной им научно-исследовательской работы «Малогабаритные лазерные дальномеры-высотомеры для определения характеристик профиля подстилающей поверхности».

**Достоверность результатов и выводов обеспечивается** согласованием расчетных данных с результатами теоретических и экспериментальных исследований. Построенная в пакете OrCAD модель (применительно к реальной схеме) с использованием схемы фотоприемного тракта с введением одного или двух дифференцирующих звеньев позволила с достоверностью 0,8 сравнить точностные расчеты в ПО MATLAB 7.0 с экспериментальными результатами определения временного положения сигнала методом пересечения нуля.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и списка литературы. Работа выполнена на 152 страницах машинописного текста и содержит 68 рисунков, 12 таблиц, 62 наименований источников используемой литературы.

#### **Основное содержание диссертации.**

**Во введении** обоснованы актуальность работы, цель и задачи исследований, методы исследований, научная новизна, практическая значимость, защищаемые положения, представлена апробация работы и личный вклад соискателя.

**Первая глава посвящена** анализу литературных данных использования импульсных лазерных дальномеров на основе твердотельных и полупроводниковых лазеров. В главе сформулированы основные задачи высотометрии для контроля окружающей среды и характеристик объектов подстилающей поверхности – наклонной дальности и пространственной структуры. Проведенные сравнительные исследования имеющихся высотомеров показали, что они не обеспечивают решения ряда задач.

**Во второй главе представлен** энергетический расчет дальности действия, обоснование требований к фотоприемному устройству, расчет точности измерения дальности и скорости импульсного высотомера на основе твердотельного лазера.

Диапазон измеряемых дальностей ограничивается, с одной стороны, аппаратными характеристиками (теневого зоной, емкостью измерителя временных интервалов, частотой зондирования и т.п.), а с другой – энергетическим потенциалом дальномера. Показано, что заданная дальность действия обеспечивается при соблюдении неравенства, определяемого уравнением лазерной локации:  $E_{min} < E_{пр} = E_0 \cdot K \cdot D_{пр}^2 \cdot \tau_a \cdot \tau_0 / 4R^2$ , (1) где  $E_{min}$  - реальная чувствительность;  $E_{пр}$  - энергия сигнала, поступающего на фотодиод приемного устройства;  $E_0$  - энергия зондирующего сигнала;  $K = \iint_{\infty} \Psi(x,y)p(x,y)dxdy / \iint_{\infty} \Psi(x,y)dxdy$  – коэффициент использования излучения, где  $p(x,y)$  - пространственное распределение коэффициента яркости цели;  $\Psi(x,y)$  - диаграмма направленности выходного зондирующего пучка;  $D_{пр}$  - диаметр приемного объектива;  $\tau_a = e^{-2\mu R}$  - коэффициент пропускания атмосферы на трассе;  $\mu$  - показатель ослабления;  $\tau_0$  – коэффициент пропускания оптики приемного канала дальномера;  $R$  – дальность до цели. Показатель ослабления  $\mu$  связан с метеорологической дальностью видимости  $V$  (км) известным эмпирическим выражением (формулой Кошмидера). Мощность фоновой засветки на рабочей площадке фотоприемника равна:  $P_{\phi} = \frac{\pi}{4} B \cdot S_{пр} \cdot \theta^2 \Delta\lambda \cdot \tau_0$ , (2) где  $B$  -

спектральная плотность энергетической яркости фона, Вт/м<sup>2</sup> ср\*мкм;  $\theta = D/F$  - относительное отверстие приемного объектива;  $\Delta\lambda$  - полоса пропускания узкополосного фильтра, мкм;  $\tau_0$  - коэффициент пропускания объектива на рабочей длине волны;  $S_{пр}$  - площадь чувствительной площадки фотоприемника, м<sup>2</sup>. Фототок  $I_{\phi}$ , А, на выходе фотоприемника:  $I_{\phi} = S_{\lambda} P_{\phi}$  (3) где  $S_{\lambda}$ , А/Вт, - спектральная чувствительность фотоприемника. Спектральная плотность энергетической яркости типичных естественных фонов, а также соответствующие им значения мощности фоновой засветки и фототока фона рассчитывались при:  $\theta = 1:4$ ;  $\tau_0 = 0,9$ ;  $\lambda = 1,540$  мкм;  $\Delta\lambda = 0,04$  мкм;  $S_{пр} = \pi d_{пр}^2 / 4$ , где  $d_{пр} = 0,15 \cdot 10^{-3}$  м – диаметр чувствительной площадки фотоприемника. Из расчетных данных следует, что для работы на длине волны 1,540 мкм наиболее перспективны безлавинные фотоприемники  $A_{III} B_V$  (фотодиоды InGaAs/InP).

**В третьей главе обоснованы** предложенные методы повышения точности измерений и привязки, выбор твердотельного лазера с пассивным затвором и фотоприемника для высотомеров с безопасной для зрения длиной волны излучения 1540 нм.

*Метод двойного лазерного зондирования удаленных объектов.* Недостатком известного моноимпульсного лазерного зондирования удаленных объектов является его практическая непригодность для регистрации формы отраженного объектом сигнала, которая может нести важную информацию о протяженности объекта вдоль трассы зондирования. Этот недостаток вызывается двумя причинами. Первая - необходимость регистрации структуры принимаемого сигнала практически на протяжении всей трассы зондирования от высотомера до объекта. Эта величина может достигать нескольких десятков и сотен метров, что требует большого объема памяти при регистрации сигнала. Вторая -

необходимость осуществлять одновременное измерение высоты и регистрации формы сигнала. В этом случае электрические наводки, неизбежные в процессе измерения дальности, искажают принимаемый сигнал и не позволяют регистрировать его форму с достаточной точностью. Указанный недостаток устраняется за счет *предлагаемого метода двойного лазерного зондирования*. На рис. 1 представлена временная диаграмма процесса двойного лазерного зондирования.

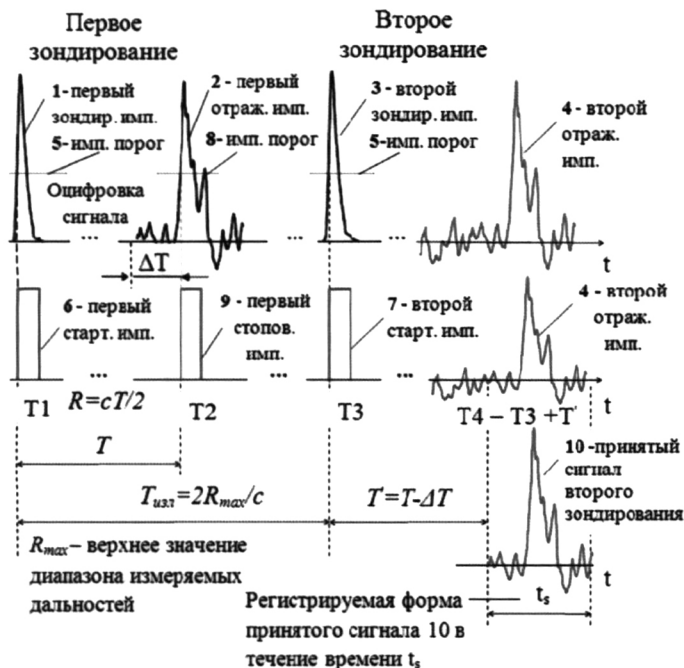


Рис. 1. Временная диаграмма процесса двойного лазерного зондирования удаленного объекта

При превышении первым 1 и вторым 3 зондирующими импульсами порога 5 формируют соответственно первый 6 и второй 7 стартовые сигналы. При превышении первым отраженным импульсом 2 порога 8 формируют стоповый импульс 9. Регистрируют моменты формирования первого и второго стартовых импульсов первого стопового сигнала  $T_2$ . Определяют интервал времени  $T$  между моментами  $T_1$  и  $T_2$ . Затем, начиная с момента  $T_3$  формируют временной интервал  $T'$ , и, по его окончании в момент времени  $T_4$ , регистрируют отрезок 10 реализации принятого сигнала длительностью  $t_s$ , позволяющий регистрировать форму принимаемого сигнала. Предлагаемый метод позволяет максимально сократить длительность регистрируемой

информации принимаемого сигнала за счет синхронизации начала процесса регистрации с началом сигнала и обеспечивает одновременное определение пространственной структуры зондируемого объекта и дальности до него при минимальном объеме аппаратуры и точности в 4-5 раз выше по отношению к моноимпульсному методу зондирования.

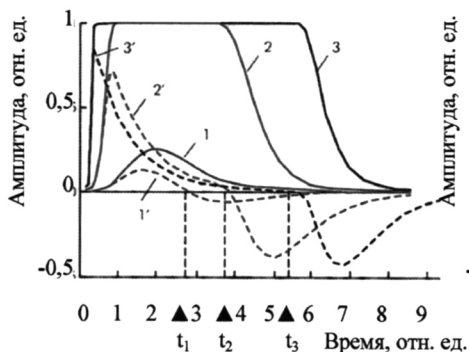


Рис. 2. Результаты моделирования временной фиксации сигнала методом пересечения нуля с одним дифференцирующим звеном в устройстве временной привязки:

1, 2, 3 – сигналы на входе ДЗ; 1', 2', 3' – сигналы на входе нуль-компаратора НК;  $t_1, t_2, t_3$  – результаты временной привязки; сигнал 1 соответствует линейной зоне, сигналы 2 и 3 – перегрузкам  $10^3$  и  $10^6$ , соответственно; масштаб по оси времени 6,67 нс/дел (1 м в единицах дальности); длительность принятого импульса в линейном диапазоне  $t_{\text{л}} \sim 10$  нс; постоянная времени ДЗ  $\tau = 1/\alpha \sim 5$  нс, где  $\alpha$  – коэффициент затухания.

**Метод временной привязки.** Так как приемный канал высотомера содержит линейный преемо-усилительный тракт и устройство временной привязки импульсов, формирующее импульсы «старт» и «стоп», то простейший и наиболее распространенный метод привязки – по фронту импульса, а наибольшая точность обеспечивается временной привязкой импульсов по положению их максимальных значений. Этот метод реализуется

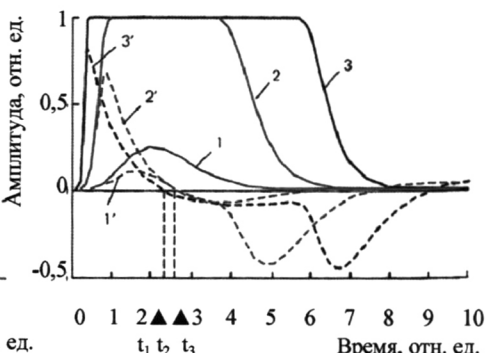


Рис.3. Результаты моделирования временной фиксации сигнала методом пересечения нуля с двумя последовательно соединенными дифференцирующими звеньями в устройстве временной привязки:

1, 2, 3 – сигналы на входе ДЗ<sub>1</sub>; 1', 2', 3' – сигналы на входе нуль-компаратора;  $t_1, t_2, t_3$  – результаты временной привязки для модифицированного устройства временной привязки и сигналов с соотношением амплитуд  $1:10^3:10^6$ ; масштаб по оси времени 6,67 нс/дел (1 м в единицах дальности).

устройством привязки, построенным по принципу фиксации момента пересечения нуля, которое содержит последовательно включенные дифференцирующее звено с постоянной времени  $\tau_d > 0$  ( $0,5t_{\text{н}}$ ) и нуль-компаратор, где  $t_1$  – длительность входного сигнала.

На рис. 2 показаны результаты моделирования временной фиксации сигнала методом пересечения нуля с одним дифференцирующим звеном в устройстве временной привязки. При этом задержка фиксации пересечения нуля относительно точки максимума сигнала в линейной зоне равна 5 нс (0,7 м), а при максимальной перегрузке - 35 нс (5,3 м), то есть нестабильность временной привязки больше 2,68 м, что лишает этот метод преимуществ по сравнению с простейшим методом фиксации по уровню сигнала. Этот недостаток устранен в предлагаемом модифицированном устройстве временной привязки, в схеме которого используются два последовательно соединенных дифференцирующих звена. Постоянная времени первого звена составляет, как и в первом случае, половину длительности входного сигнала  $0,5t_{\text{н}}$ , а для второго -  $t_{\text{н}}$ . Исследования показали, что при таком соотношении нестабильность временной привязки минимальна. Результаты моделирования для модифицированного устройства временной привязки показаны на рис. 3. Неточность временной привязки модифицированного устройства эквивалентна ошибке дальности 0,2-0,3 м, что на порядок точнее по сравнению с прототипом.

*Обоснование выбора активного элемента для лазеров с длиной волны излучения 1540 нм.* На этапе выполнения диссертационной работы особый интерес представляет исследование и создание лазеров на вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР-лазеров). Метод ВКР позволяет преобразовывать излучение лазеров на неодимосодержащих средах (1,05-1,08 мкм) в спектральную область излучения безопасную для зрения (1,45-2,5 мкм). Для генерации с длиной волны 1540 нм наиболее подходящим является кристалл калий-гадолиниевого вольфрамата, активированного ионами неодима ( $\text{КТВ} \cdot \text{Nd}^{3+}$ ). В данных лазерах излучение на  $\lambda = 1351$  нм преобразуется в активном элементе в первую стоксову компоненту с излучением 1538 нм при участии ВКР-активных колебаний  $901 \text{ см}^{-1}$ . ВКР-лазер на кристалле  $\text{КТВ} \cdot \text{Nd}^{3+}$  диаметром 3 мм и длиной 50 мм с пассивным затвором на кристалле  $\text{ИАГ} \cdot \text{V}^{2+}$  (аломоиттриевый гранат, активированный ионами ванадия) обеспечивает необходимую выходную энергию 5-7 мДж.

*Обоснование выбора фотодиода.* Для формирования фотоприемного устройства выбираем  $\text{InGaAs PIN}$  фотодиод ДФД 250, обладающий необходимыми характеристиками: высокая чувствительность на  $\lambda = 1,55$  мкм (0,8-0,85 А/Вт), спектральный диапазон 0,95-1,7 мкм, размер фоточувствительной площадки 250 мкм.

**В четвертой главе обоснован** выбор импульсного лазерного диода и фотоприемника, произведен энергетический расчет дальности и точности высотомера. Импульсные полупроводниковые лазеры, как и твердотельные, обладают возможностью генерации импульсов малой длительности. Однако вследствие присущего им ограничения импульсной мощности при малой длительности импульса усугубляется дефицит энергии зондирующего сигнала. Этот недостаток преодолевается тем, что за счет применения метода некогерентного накопления светолокационной информации имеется возможность повышения точности и дальности за счет статистической обработки накопленных данных.

Предложенные методы повышения точности позволяют увеличить длительность импульса до 100-300 нс и более при сохранении высокой точности измерения.

*Основным содержанием главы является исследование возможных режимов работы высотомеров с целью повышения дальности и точности за счет реализации потенциальных возможностей лазерного измерителя дальности с накоплением.*

*Моноимпульсный режим* обеспечивает максимальную дальность действия 300 м.

*Режим накопления.* При некогерентном накоплении теоретически энергетический выигрыш  $K_N \sim \sqrt{N}$ , где  $N$  – количество циклов (объем) накопления. Реально при однопороговом (бинарном) накоплении выигрыш на 20-30 % меньше теоретического значения.

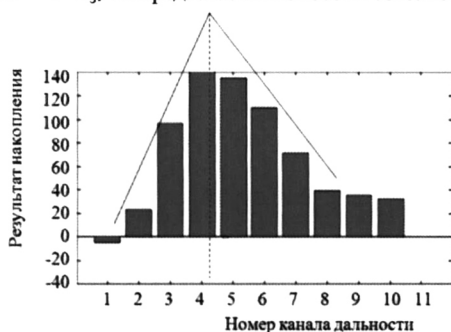
Техническая сущность известного способа светолокационного определения дальности методом некогерентного накопления (Patent WO 2005/006016) состоит из серии циклов зондирования, в каждом из которых на цель посылают лазерный зондирующий импульс, после излучения зондирующего импульса квантуют время на дискреты, принимают отраженный целью импульс, вырабатывают в каждой из дискрет времени гипотезу об отсутствии или наличии сигнала путем порогового преобразования принятой смеси сигнала и шума, формирования соответствующего гипотезе числа и накопления формируемых чисел в виде сумм для каждой дискреты времени, по завершении накопления выделяют те дискреты времени, где накопленная в течение серии циклов зондирования сумма превышает заданное число, и по этим накопленным суммам судят о дальности до цели. В указанном способе осуществляется процедура цифрового некогерентного накопления, реализующая метод статической проверки гипотез (рис. 4а и 4б). Недостатком данного способа является необходимость большого объема быстросредствующей цифровой регистрирующей аппаратуры. Предложены способы реализации потенциальных возможностей импульсного измерителя с накоплением. Новизна предлагаемого первого способа увеличения измеряемой дальности без увеличения тактовой частоты и количества независимых каналов накопления состоит в том, что после определения дальности до цели известным методом: а) в каждом цикле зондирования импульс излучают в течение длительности нескольких дискрет времени; б) по окончании накопления выделяют дискрету времени, в которой накопленная сумма максимальна; в) определяют задержку  $T$  отраженного сигнала относительно момента послышки зондирующего импульса как первый начальный момент массива накопленных сумм в окрестности выделенной дискреты времени и по этой задержке определяют дальность до цели  $R = c(T - T_0)$ , где  $T_0$  - аппаратная константа.

На рис. 4б и 4в приведены результаты компьютерного моделирования двухпорогового накопителя.

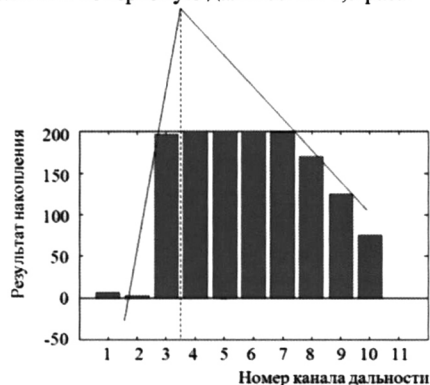
*Задержку* отраженного сигнала определяли по формуле первого начального момента, с весовыми коэффициентами при значениях накопленных сумм:

$$T_3 = \left[ (j - p) + \frac{\sum_{l=1}^{q-1} l k_{j-m+l} K_{j-m+l}}{\sum_{l=1}^q k_{j-m+l} K_{j-m+l+1}} \right] \Delta T,$$
 где  $j$  - номер временной дискреты, в которой накопленная сумма максимальна;  $K_{(a)}$  - накопленная сумма в (а)-й дискрете;  $k_{(a)} = 1$  - весовой коэффициент (а)-й дискреты;  $m = t_{\text{фр}} / \Delta T$  -

количество дискрет;  $t_{\text{фр}} = 2$  - длительность переднего фронта импульса;  $q = t_u / \Delta T$  - количество дискрет, соответствующих длительности импульса;  $t_u = 6$  - длительность импульса;  $p=3$  - поправочное число, характеризующее точку временной привязки сигнала;  $\Delta T = 1$  - длительность дискреты; длина анализируемого массива  $q=6$ ,  $T_3 \equiv R$  ( $\equiv$  знак численного равенства). Оценка дальности  $R$  формируется по выражению  $R = c \cdot T_3 / 2$ . Предлагаемый способ позволяет увеличить измеряемую дальность в 1,3 раза.

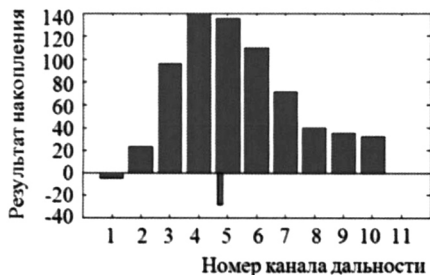


а

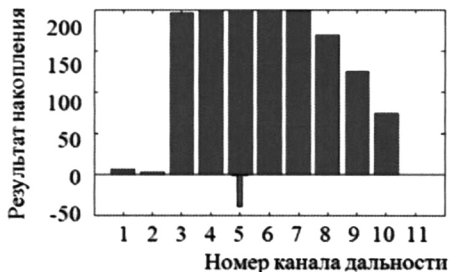


б

Способ временной привязки накопленного массива данных по известному методу при отношении сигнал/шум = 1 (а) и при отношении сигнал/шум = 10 (б). Точность привязки 0,7 м



в



г

Способ временной привязки накопленного массива данных по предложенным методам при отношении сигнал/шум = 1 (в) и при отношении сигнал/шум = 10 (г). Точность привязки 0,2 м

Рис. 4. Реализация результатов накопления в 10 каналах дальности 2-уровневого накопителя, индекс внизу показывает положение центра тяжести полученных массивов. Новизна предлагаемого второго способа повышения точности определения дальности в широком диапазоне амплитуд принимаемых сигналов состоит в устранении недостатка



известного метода – зависимости оценки дальности до цели от амплитуды отраженного сигнала. Новизна предлагаемого метода заключается в том, что после определения дальности до цели известным методом: а) предварительно проводят калибровку, в которой определяют оценку дальности до цели; б) изменяют амплитуду отраженных целью импульсов в пределах рабочего динамического диапазона; в) для каждого значения амплитуды определяют оценку дальности, ее смещение относительно истинного значения и сумму накопленных сумм в дискретах времени, находящихся в окрестности дискреты с максимально накопленной суммой, и, в зависимости от суммы накопленных сумм, вводят в оценку дальности поправку.

На рис. 4в и 4г приведены результаты заполнения массива данных после накопления соответственно при отношении сигнал/шум 1 и 10.

Анализ показал, что предлагаемый метод позволяет уменьшить систематическую ошибку примерно на порядок, благодаря чему реальная погрешность измерения дальности может быть снижена до 0,05 м при ширине дискреты 6,67 нс при тактовой частоте 150 МГц и дискретности 1 м. При этом среднеквадратическая погрешность измерения дальности  $\sigma_R$  в серии зондирования  $N=200$  циклов и дискрете дальности  $\Delta R = 1$  м составляет  $\sigma_R = 0,4\Delta R/\sqrt{N} \approx 0,03$  м.

*Новизной предлагаемого третьего способа* оценки дальности в широком диапазоне принимаемых сигналов, как альтернатива второму способу, является:

а) как и во втором случае известным методом формируют оценку дальности до цели; б) *предварительно проводят калибровку*, в процессе которой определяют начальное значение дальности до цели; в) изменяют амплитуду отраженных целью импульсов в пределах рабочего динамического диапазона; г) для каждого значения амплитуды определяют оценку дальности, ее смещение относительно истинного значения и количество смежных дискрет, в которых накопленная сумма равна предельному значению, *в зависимости от этого количества, вводят в оценку дальности поправку.*

На рисунках 4в и 4г приведены примеры заполнения массива данных после накопления соответственно при отношении сигнал/шум 1 и 10. Также как и для предлагаемого способа 2 способ 3, учитывающий поправку на величину принимаемого сигнала, позволяет в 3,5 раза снизить систематическую ошибку измерения дальности и обеспечивает среднеквадратическую погрешность измерения дальности до 0,03 м.

*Рассмотрен также ресурс* повышения точности высотомеров с накоплением за счет схемы с синхронным стартом, позволяющей синхронизировать момент излучения зондирующего сигнала лазера с тактовой частотой (ИВИ) и обеспечить среднеквадратическое отклонение (СКВО) временной фиксации относительно тактовой последовательности на порядок по отношению к схеме с асинхронным стартом. В совокупности, новые светолокационные способы определения дальности и схема с синхронным стартом позволяют на 40-50 % повысить реальную возможность измерителя с накоплением.

**В пятой главе показано** использование результатов, полученных в диссертации.

1. Импульсные высотомеры на основе твердотельных лазеров типа ЛД-2М были использованы в ООО "ОТКРЫТОЕ НЕБО+" в составе цифрового топографического аэроосмотрового комплекса (ЦТАК), применяемого для аэроосмотров: площадных объектов,

требующих картографического обеспечения в полном объеме (площади обновляемых листов топографических карт, городские и сельские поселения); площадных объектов, требующих частичного картографического обеспечения (лесные угодья, сельскохозяйственные и геоботанические объекты); линейно-протяженных объектов (продуктопроводы, автомобильные и железные дороги, объекты гидрографии).

2. Импульсные высотомеры на основе полупроводниковых лазеров типа ЛД-1М были использованы в ОАО "Раменский приборостроительный завод" в вертолетном комплексе дистанционного мониторинга атмосферы и поверхности земли для измерения интегральных концентрации газов и паров различных веществ в атмосфере и аэрозолей на поверхности земли в целях проведения воздушной химической дистанционной разведки.

### **Основные результаты и выводы**

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования режимов работы импульсных высотомеров на базе твердотельных и полупроводниковых лазеров с безопасной для зрения длиной волны излучения позволяют использовать их в системах лазерного картографирования, определения характеристик объектов подстилающей поверхности, применять в комплексах химической разведки, контроля окружающей среды.

#### *Предложены и аппаратурно реализованы*

1. *Метод двойного лазерного зондирования удаленных объектов подстилающей поверхности, основывающийся на излучении двух зондирующих импульсов и двойного включения добротности за один цикл накачки, позволяет:*

- а) *предельно сократить* длительность регистрируемой информации принимаемого сигнала за счет синхронизации процесса регистрации с началом сигнала;
- б) *повысить качество* регистрации сигнала, минимизировать интервал дискретизации и существенно *упростить* регистрирующую аппаратуру за счет *повышения* в 5 раз (до 150 МГц) тактовой частоты;
- в) *предельно сократить* интервал между первым и вторым зондированием, что позволяет получать результаты измерения дальности до объекта и регистрации его профиля практически из одной точки по сравнению с моноимпульсным зондированием;
- г) *обеспечить* одновременное *определение* пространственной структуры зондируемого объекта и дальности до него с точностью 0,2-0,3 м.

2. *Метод временной привязки импульса высотомера на основе твердотельного лазера, основанный на модификации известного метода пересечения нуля за счет введения в структуру приемного тракта второго дифференцирующего звена с регулируемой постоянной времени позволяет:*

- а) *устранить недостаток известного метода* – уход момента пересечения нуля при изменении амплитуды входного сигнала в динамическом диапазоне  $10^6$  и *обеспечить* снижение неточности временной привязки высотомера на порядок по сравнению с прототипом.
- б) полученные результаты подтверждены машинным моделированием функциональной схемы в пакете OrCAD и натурным моделированием, выполненным на базе макета фотоприемного тракта лазерного высотомера ДЛ-2М, и открывают перспективу существенного повышения точности моноимпульсных дальномеров на основе твердотельных лазеров без существенного усложнения аппаратуры.

3. *Новые способы* реализации потенциальных возможностей измерителя дальности с накоплением на основе полупроводникового лазера по отношению к известному способу некогерентного накопления методом статистической проверки гипотез обеспечивают:

а) *увеличение* измеряемой дальности в 1,3 раза за счет оценки временного положения сигнала по временной фиксации его по центру тяжести массива данных после накопления;  
б) *снижение* среднеквадратической погрешности измерений на порядок за счет введения в оценку дальности поправки по сумме накопленных сумм или по количеству смежных дискрет, в которых накопленная сумма равна предельному значению.

4. Схема с синхронным стартом высотомера с накоплением, обеспечивающая синхронизацию момента излучения зондирующего сигнала с тактовой частотой измерителя временных интервалов, позволяет уменьшить среднеквадратическое отклонение временной фиксации зондирующего сигнала в 10 раз по отношению к схеме с асинхронным стартом.

В совокупности, предлагаемые светолокационные способы определения дальности и схема с синхронным стартом позволяют на 40-50% повысить реальную возможность измерителя с некогерентным накоплением.

#### **Основные результаты опубликованы в работах:**

##### ***Статьи в научных журналах и сборниках:***

1. Вильнер В. Г. Оценка возможностей светолокационного импульсного измерителя дальности с накоплением / В.Г. Вильнер, А.И. Ларюшин, Е.Л. Рудь. – М.: Фотоника. - 2007. -№6. –С. 22–26.

2. Вильнер В.Г. Метод контроля характеристик объектов подстилающей поверхности с борта летательного аппарата / В.Г. Вильнер, А.И. Ларюшин, Е.Л. Рудь. - Казань.: Изв. ВУЗов. Проблемы энергетики. – КГЭИ, 2008. -№ 9-10. –С. 134–137.

3. Вильнер В.Г. Методы повышения точности импульсных лазерных дальномеров/ В.Г. Вильнер, А.И. Ларюшин, Е.Л. Рудь. –М: Наука, технология, бизнес. -2008. -№3. –С. 118–123.

4. Ларюшин А.И. Модифицированное устройство временной привязки импульсного лазерного дальномера для летательных аппаратов/ А.И. Ларюшин, В.Г. Вильнер, Е.Л. Рудь.–М.: Электроника и электрооборудование транспорта. -2008. -№2. –С. 23–26.

5. Патрикеев А.П. Распределенная автоматизированная система обучения по дисциплине “Автоматизированные системы контроля и оценки технического состояния авиационного оборудования”/ А.П. Патрикеев, С.М. Гладкин, Е.Л. Рудь. –М.: Материалы научно-методической конференции Военно-воздушной инженерной академии имени профессора Н.Е. Жуковского. Издание ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2007. -С. 126–129.

##### ***Патенты:***

6. Пат. 2341770 РФ. Устройство временной привязки лазерного высотомера / В.Г. Вильнер, И.В. Вильнер, В.Г. Волобуев, Е.Л. Рудь, Б.К. Рябокуль; зарегистрирован 20.12.2008.

7. Решение 2007122010/28(023969) от 16.10.08 о выдаче патента на изобретение “Способ лазерного зондирования удаленного объекта”/ В.Г. Вильнер, И.В. Вильнер, В.Г. Волобуев, В.И. Дубинин, К.В. Значко, Е.Л. Рудь, Б.К. Рябокуль; заявлено 15.06.2007.

Сдано в печать  
Формат 60×90/16 Объем 1 п.л.  
Тираж 100 экз. Зак №

---

Отпечатано ФГУП НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха,  
117342, Москва, Введенского, 3